次用户信道使用公平和 QoS 保障原则的 FQMAC 协议

苏凡军，张　聪

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘　要：针对异构认知无线电网络共存的情况，提出了 FQMAC（fair and QoS guaranted MAC）协议。采用信标帧同步，将时间划分为信标周期，在信标周期内分别进行信道感知、信道协商和数据传输；将被其他异构网络的次用户占用的信道也作为可用信道。根据信道质量将所有可用信道划分等级，根据次用户业务特征将次用户划分等级。等级高的次用户优先预约等级高的信道。对信道协商阶段的合理时长通过建立马尔可夫链模型做了理论分析，得出其合理时长的理论值。仿真实验结果证明 FQMAC 可以较好地提升网络的吞吐量，保障了用户的 QoS（Quality of Service），并实现了较好的公平性。

关键词：异构；认知无线电网络；划分等级；QoS 保障；公平性

中图分类号：TN915.04　　doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2018.06.0457

FQMAC: protocol of secondary user fair channel using and QoS guarantee

Su Fanjun, Zhang Cong

(*School of Optical-Electrical & Computer Engineering*, *University of Shanghai for Science & Technology*, *Shanghai* 200093, *China*)

Abstract: This paper proposed FQMAC (fair and QoS guaranteed MAC) protocol used in the scenario of heterogeneous cognitive radio networks coexisting. Time was divided into beacon periods using beacon frame synchronization. During one beacon period, channel sensing, channel negotiation, and data transmission were performed respectively. The channels occupied by secondary users of other heterogeneous networks were treated as useful channels too. Useful channels were classified into different levels according to their quality, and secondary users were classified into different levels according to their service characteristics too. High level users prioritize high level channels. The reasonable duration of the channel negotiation phase was obtained by establishing a Markov chain model. Simulation results show that FQMAC can improve the throughput of the network, guarantee the users' QoS (Quality of Service) , and achieve better fairness.

Key words: heterogeneous; cognitive radio networks; classify; QoS guaranteed; fairness

0　引言

无线通信领域现在广泛使用的还是固定频谱接入策略。然而这种策略使得授权频谱的利用率并不高，而另一方面，可用频谱资源已经基本划分完，一些没有授权频带的用户缺少可用的频谱资源。因此，认知无线电技术就被提了出来。认知无线电技术允许次用户（未授权用户）机会式地接入暂时未被使用的授权频谱，利用主用户的通信间歇期进行通信。这样就在不影响主用户的前提下，提高了频谱资源的利用率，较好的解决了上述问题。但是目前认知无线电领域还没有国际统一的标准通信协议，而且由于无线信道上通信的控制和协调发生在 MAC（media access control，媒体访问控制）层，因此设计一个好的 MAC 协议对于 CRN（cognitive radio network,认知无线电网）具有重要意义。认知无线网络的 MAC 协议研究目前是一个热点问题，大量的专家学者把精力集中在了这一领域，现在已经有各种类型的 MAC 协议设计被提了出来。例如文献[1]的作者提出了一种基于频谱预测技术的 MAC 协议，它采用一种统计的信道分配策略，这种策略可以提高吞吐量并减小对主用户的干扰。Manyi 等人针对 CRSN（cognitive radio sensor network，认知无线电传感器网络）提出了一种基于前导码采样的自适应 MAC 协议 APS-MAC[2]，该协议支持机会频谱接入，同时解决了 CRSN 中的节能问题。Nafees 等人提出了一种认知无线电 ad hoc 网络的跨层 MAC 协议 RAPE[3]，RARE 协议可以维持较少数量的簇和稳定数量的公共信道而达到较好的性能。Wu 等人提出了用于 CRAHN（cognitive radio ad hoc networks）的邻居感知距离估计 MAC 协议-NMAC[4]，在这项研究中，根据 SU(secondary

收稿日期：2018-06-05；**修回日期：**2018-07-27

作者简介：苏凡军（1976-），男，山东泰安人，讲师，博士，主要研究方向为计算机网络、下一代网络 QoS 技术（sufanjun@126.com）；张聪（1991-），男，硕士研究生，主要研究方向为认知无线电网络频谱分配与信道接入策略.

user)通信对之间的邻居感知估计出的距离来控制发射机的功率，从而减轻了多通道 CRAHN 的隐藏和暴露的终端问题，并且增加了吞吐量，降低了 PU(primary user)中断概率。还有一些 MAC 协议是基于信道协商机制设计的。此类 MAC 协议维护一个 CCC（common control channel，公共控制信道），预先通过 CCC 协商和预留数据信道。例如，文献[7]提出的用于 CM2M 网络的数据库驱动的 MAC 协议；文献[8]提出的动态控制信道 MAC 协议-DCC-MAC；文献[10]提出的使用 CCC 信道的同步式 MAC 协议 OMC-MAC。但是上述 MAC 协议均没有考虑异构 CRN 共存的问题。所谓异构 CRN，是指采用不同的网络接入技术或不同的通信协议的网络。目前 CRN 没有统一的通信标准，不同局域网采用不同的通信规则，CRN 的硬件设备更是各种各样，这就导致了 CRN 的异构性[11]。而随着 5G 网络和物联网的发展，未来异构网络并存的情况会越来越多，这就给网络通信协议提出了更高的要求。而 CRN 以其独特的适应性和智能性优势，必将是下一代通信网络中的重要组成部分。因此，本文着重从异构 CRN 共存的情况进行研究，考虑在异构 CRN 共存的场景下，如何实现 CRN 的高效通信和公平性、QoS 支持的问题。

文献[11]第一次考虑到了不同 CRN 共存的情况。如文中所述，两个异构的 CRN 可能使用不同的传输波形，这使得一个 CRN 内的次用户无法识别另一个 CRN 内的波形，如果某一授权信道被占用，当前次用户只知道信道被占用了，但是并不知道占用信道的是主用户还是次用户。而现在大多数提出的 MAC 层协议都是采用的两状态信道模型，即把信道分为两种状态：忙和空闲。因此，次用户如果检测到信道忙，就只能认为信道被主用户占用了，然后单纯地放弃信道。但是实际上还有可能是另一个 CRN 内的次用户在占用，这就损害了 SU 之间的公平性。针对这种情况，文献[11]第一次提出了三状态信道模型，即把 “忙”状态进一步划分为“主用户占用”和“次用户占用”两种状态。而且文中设计了一种感知算法：距离估计检测算法，用来检测当前信道具体处于三个状态中的哪一个。文献[12]正是基于这种三状态信道模型设计出了 FMAC，遵循 FMAC 协议的 SU 节点对于信道忙的状态启用距离估计算法[11]判断当前信道上是主用户的信号还是次用户的信号，如果是后者，就采用竞争机制竞争使用信道，改善了次用户之间的公平性。

虽然 FMAC 改善了公平性，但是 SU 之间频繁地竞争信道会一定程度上降低信道的吞吐量，同时 FMAC 太过强调竞争，忽略了空闲信道的充分利用。此外该算法没有 QoS 的感知与保障机制，不能满足一些用户时延等方面需求。因此，本文在引入三状态模型的基础上，使用信标帧同步的方式，设计了一种新的 MAC 协议：FQMAC。

本文设计的 FQMAC 考虑了在异构 CRN 共存的场景下，如何在保证公平性的前提下，适当地减少竞争，提高信道的吞吐量，同时可以充分地利用空闲信道，并且提供 QoS 支持的问题。

FQMAC 借鉴了文献[10]的无竞争数据传输阶段的思想，将数据传输阶段设计为部分无竞争。并且在此基础上，提出了信道分级和用户分级机制，并为网络中的次用户提供了针对性的 QoS 保障。同时本文建立了马尔可夫链模型，进行了理论分析，得出了信道协商与预留阶段的合理时长。经过实验仿真，证明本文的设计在一定程度上提高了信道的利用率，并维护了次用户之间的公平性，提高了网络的吞吐量，而且有效降低了高 QoS 需求的用户的信道接入延迟，保证了服务质量。

1　FQMAC 协议设计

同大部分现有文献不同，本文考虑了多个异构 CRN 共存的情况,这种异构性，在 FMAC 论文[12]中也提到了。在信道被异构网络次用户占用的情况下，FAMC 让次用户去和占用信道的次用户竞争使用信道，这样就增加了次用户之间的公平性。但是该协议会使 SU 之间频繁地竞争信道，一定程度上降低了信道的吞吐量，而且 FMAC 单纯强调竞争，未提及如何有效利用空闲信道。因此本文通过将信道上的时间分为周期性的三个阶段（其中数据传输阶段是无竞争的），对于异构 CRN，设计了 FQMAC 协议，FQMAC 协议可以在保证次用户之间的公平性的前提下，减少一部分竞争，同时为网络中不同的次用户提供不同的 QoS 支持。

从可行性和经济性的角度考虑，本文假设每个 SU 节点都拥有一个半双工收发机。协议设计采用控制信息交换机制（RTS-CTS 机制）和信标帧同步机制，这种机制采用的是先对信道进行预约，之后邻居节点各自设置 NAV 的方式，从而避免了隐藏终端的问题。本文假定在 CRN 内有一个全局 CCC（common control channel），用来交换控制信息。

1.1　信标周期结构

时间帧被分成周期性的信标间隔 BI（Beacon Interval）。SU 由周期性的信标信号同步。每当有一个 SU 想要加入网络时，它首先收听 CCC 上的至少一个信标帧的信号，以使其自身与网络的其余部分同步。如果一直没有收听到信标帧信号，它就自己开始发送周期性的信标帧信号，作为本 CRN 的第一个节点，让以后加入的节点和它保持同步[10]。BI 分为三个阶段：感知阶段、竞争 CCC 信道阶段（信道协商阶段）、数据传输阶段。如图 1 所示是每一个信标周期的时间结构。

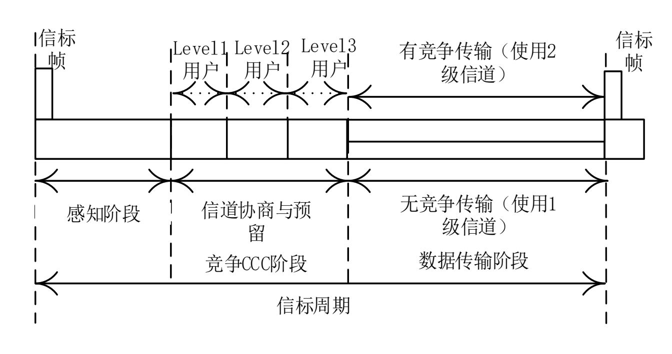


图 1　信标周期的时间结构

Fig.1　Time structure of beacon cycle

1.2 信道感知

如图 1 所示，FQMAC 协议规定在每一个信标间隔内的第一个阶段为信道感知阶段，在这个阶段 SU 节点检测可用信道，获取最新的信道信息。在感知阶段，FQMAC 协议规定所有的 SU 用户都不可以进行传输，以便感知结果不受周围 SU 节点的干扰。每个 SU 独立地感知信道并在感应阶段结束后取得所有可用信道的列表，并把这个列表保存在当前 SU 节点。

假设有网络 A 和网络 B，两个网络都是认知无线网络，都可以采用认知的方式使用授权频段。假设网络 A 中的节点采用本文提出的 FQMAC 算法，而网络 B 采用的是其他的认知网络协议。这两个网络为异构网络。

FQMAC 采用信标帧同步的方式，将时间划分为信标周期，在信标周期内分别进行信道感知、信道协商和数据传输。因此在信道感知阶段，网络 A 中的用户都停止发送，进入信道感知状态。而由于网络 B 为异构网络，所以在网络 A 中节点进行信道感知的时候，网络 B 中很多节点可能仍处于通信发送状态，假设 B 中某对节点此时正使用某个授权信道 H_5 进行数据收发。网络 A 中节点此时信道感知，可以感知到空闲的授权信道以及被次用户占用的授权频段 H_5。对于这种情况，普通的认知网络由于仅仅能区分授权频段空闲还是被占用，所以采用的策略就是仅仅使用空闲信道，而放弃对 H_5 信道的使用。这样就授权信道 H_5 而言，就存在一种不公平性，因为正在使用该信道的节点不是主用户。而公平的方式就是网络 A 中的用户与网络 B 中的次用户采用竞争的方式使用授权信道 H_5。因此，FQMAC 协议也采用了距离估计算法[11]来区分主用户和次用户。

1.2.1 信道分级机制

FQMAC 协议的主要特点便是其信道分级及用户分级机制。信道分级机制的主要思想是在感知阶段，FQMAC 采用能量检测技术和距离估计检测算法[11]，检测出信道是处于什么状态，然后根据感知结果分别进行处理：a）把被主用户占用的信道过滤掉;b）把被异构 CRN 次用户占用的信道作为 2 级可用信道放入可用信道列表中;c）把空闲的信道作为 1 级可用信道放入可用信道列表中。这样，SU 节点维护的可用信道列表就有了两种可用信道：1 级可用信道和 2 级可用信道，从而允许 MAC 协议根据次用户的特点，有针对性地为次用户分配适合的信道。

1.2.2 信道协商与预留

每个有数据帧要发送的 SU 为了参与信道协商和预留机制必须参与竞争公共控制信道 CCC，这个过程发生在信标周期的第二个阶段，即信道协商阶段。竞争策略 FQMAC 协议放弃了经典的 IEEE802.11 中 DCF(Distributed Coordination Function，分布式协调功能)的二进制指数退避算法，而是采用固定窗口退避算法（取名为 FWSB 算法（fixed window size backoff algorithm)），本文将在 1.3.2 节作详细介绍。竞争阶段在信标周期的位置如图 1 所示。

1.2.3 次用户分级机制

为了满足不同 QoS 需求的用户，本文设计了用户分级机制，其主要思想是根据次用户节点对自身业务数据特征的认知，依据对时延和传输质量（丢包率）要求的高低，将次用户节点划分为三个等级：

a）level1：传输报警信息等时间敏感性数据，对时延要求较高的次用户。

b）level2：传输一般性信息，对时延要求比较一般的用户。

c）level3：传输视频、备份文件等对丢包率或时延要求较低的用户。

为了区分次用户，本文选择把次用户划分为三个等级。当然这个数字是可以根据具体情况进行调整的，假如具体网络所处的时域和空域不同，网络的环境和特征可能也不尽相同，对用户通信质量的要求苛刻度也不同，这种情况下可以作相应的调整。但是本文在这里根据大多数普通情况适用的场景，选择将次用户划分为三个等级。

1.2.4 信道协商阶段的 FWSB 退避算法

要发送数据的次用户需要竞争 CCC 信道的使用权，竞争策略本文采用的是固定窗口退避机制，即 FWSB 算法。此算法为每一个等级的次用户分别设置不同的退避时间窗口。首先设置一个固定窗口值 w,则 level1 用户的退避时间在[0, w-1]内随机产生，level2 用户的退避时间在[w,2w-1]范围内随机产生，level3 用户的退避时间在[2w,3w-1]之间随机产生。通过为三个等级的次用户设置完全不重叠的退避窗口，并且等级越高的次用户退避窗口越小，保证了等级高的次用户总是更早地接入 CCC 信道（公共控制信道），低等级用户基本不会抢在高等级用户之前获得 CCC 信道的使用权。并且本协议规定，所有等级的次用户预约信道均优先从 1 级可用信道中选择，从而使得 1 级可用信道总是优先被更高等级的用户预约到，同时高等级用户数量较少的情况下，较低等级的次用户也可以预约到 1 级信道，保证了 1 级信道的充分利用。

本文没有采用二进制指数退避算法，而是规定次用户在每一个退避阶段的退避窗口均是固定的，均分别和第一个退避阶段的退避窗口相同。例如对 level1 用户来说，当其退避计时器为 0 后进行数据传输，但是发生了碰撞，传输失败，那么它要进入第二个退避阶段重新开始一次随机退避，但是其退避计时器取值依然是从[0, w-1]中随机选取一个，如果计时器为 0 后再次发生碰撞，依然是从[0, w-1]中随机选取一个值作为退避计时器的值。同样的，level2 用户其退避窗口始终是[w,2w-1]，level3 用户始终是[2w,3w-1]。对于二进制指数退避算法，文献[13]指出 802.11 网络由于采用了二进制指数退避算法导致公平性表现并不令人满意，文献[14]也提到不同竞争窗口大小（如（0,7）和（0,15））的用户接入信道的概率不一样，会导致用户之间比较差的公平性。因此，从保障公平性的角度考虑，不适宜采用经典的二进制指数退避算法。另一方面，固定窗口退避严格保证了不同等级次用户的退避窗口在任何时候都和其他等级次用户的退避窗口是非重叠的，高等级用户的退避窗口是严格小于低等级用户的退避窗口的，这样使得三类次用户有较好的区分，

保证了高等级次用户总是比低等级次用户优先获得 CCC 的使用权，并进而优先预约到 1 级信道。

同时，为了减小放弃二进制指数退避算法带来的碰撞概率增大的影响，可以把 w 的值设置的稍大一些，这样不同次用户每次选择到相同退避时间的概率可以得到相应地减小。

1.3.3 信道协商阶段信道的预约过程

次用户首先通过 FWSB 算法竞争 CCC 的使用权，取得使用权的次用户开始信道协商过程。Level1 用户会优先选择等级 1 的可用信道（如果没有等级 1 的可用信道，就从等级 2 的可用信道中选择，在频谱资源紧缺的情况下，本协议此时更体现了它的优越性），然后封装在 RTS 中发送给目的节点，目的节点收到 RTS 后，从自己信道列表中的 1 等级信道中选择与源节点的公共信道，然后封装在 CTS 中发送给源节点，源节点收到 CTS 后，再发送一个 CRTS 给目的节点，完成信道预约过程。对于 level3 节点，则一般预约到 2 等级信道。Level2 用户的 QoS 需求属于较普通的水平，因此 FQMAC 规定它们的优先级处在 level1 用户和 level3 用户之间，相应的它们的退避窗口也处在两者中间。因此，level2 用户既可能预约到 1 级可用信道，也可能预约到 2 级可用信道。同时，按照 FQMAC 的机制，如果 1 级信道资源紧缺的情况下，level1 用户也可能预约到 2 级信道。同理，1 级信道资源富裕的情况下，level3 用户也可以预约到 1 级信道。这样就保证了 1 级可用信道不会被浪费，而不同 QoS 需求的用户又分别获取到的是相对合适的信道，保证了网络资源的合理分配，并使网络的性能指标达到最大化。

1.3 数据传输

在竞争阶段结束之后所有完成信道预留工作的节点对开始在各自的信道上独立且并行地发送数据。由于高等级用户通常预约到的是 1 级信道，因此数据传输阶段通常是无竞争的，这有效提高了信道的利用率。而低等级用户通常预约到的是 2 级信道，因此，低等级用户的数据传输阶段通常是有竞争的。数据传输阶段的竞争接入策略本文采用 802.11 网络 DCF 机制的 CSMA/CA 技术。而在数据传输阶段，次用户的数据传输是有竞争的还是无竞争的，从根本上取决于预约到的信道是 1 级还是 2 级。若是 1 级信道数据传输就是无竞争的，否则就是有竞争的。另外，如果还有节点对未在协商阶段完成信道预留，则只能等到下一个信标周期重新和所有的节点竞争 CCC 信道。数据传输阶段结束之后，所有节点清空 NAV 向量，又进入下一个信标周期，继续从感知阶段开始感知信道。

2 FQMAC 协议建模及分析

如 1.1 节所述，每一个信标周期分为三个阶段，感知阶段、信道协商阶段、数据传输阶段。对于感知阶段，由于此阶段规定所有节点都不能进行数据传输，所有节点保持同步，统一进行频谱感知，而感知效率又和硬件性能有关（目前的认知无线电节点硬件性能还不足以在有限的感知时间内感知所有的频谱范围，只能感知部分频谱，而关于感知频带的选择又是另外一个研究领域，本文的假定是认知节点可以感知所有频带，关于部分感知的研究本文在这里不做赘述），受其他因素影响不大，因此可以将感知阶段的时长固定为一个确定的值。同样的，数据传输阶段的时长主要和用户本身的业务数据量以及固定的信道传输速率有关，也可以定为一个固定值。基于上述原因，本文在此只讨论有意义的第二阶段的时长。本文假设一个网络域中有 n 个节点，其中 n_1 个 level1 用户，n_2 个 level2 用户,n_3 个 level3 用户。假设每一个节点在上一次成功发送之后，立即有另外一个帧要发送。让 f(t)代表在时隙 t 某一个节点的退避窗口大小。同时，本文还要定义一个特殊的随机过程 g(t),代表在时间 t 时节点所处的退避阶段，显然，退避阶段取值始终为 0。在这种情况下，随机过程{g(t),f(t)}是一个离散时间的马尔可夫链。Level1 用户、level2 用户、level3 用户的状态转移图分别如图 2~4 所示。

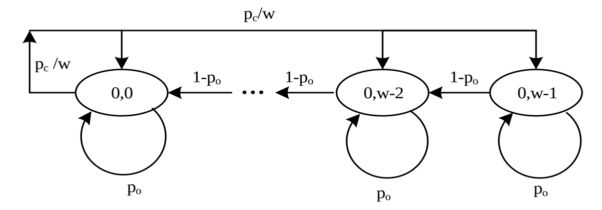


图 2 level1 节点马尔可夫链的状态转移

Fig.2 State transition of level1 node Markov chain

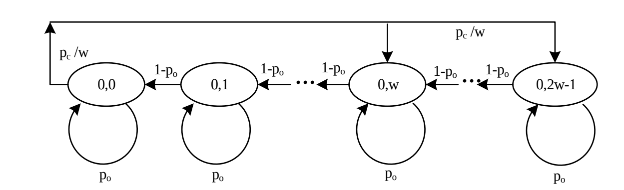


图 3 level2 节点马尔可夫链的状态转移

Fig.3 State transition of level2 node Markov chain

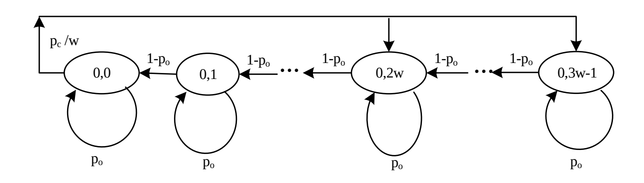


图 4 level3 节点的马尔可夫链状态转移

Fig.4 State transition of level3 node Markov chain

显然节点某一个状态所处的退避阶段皆为 0，让 s 表示节点某一个状态当前的退避窗口实际大小。那么状态{0，s}可以表示图中的所有状态。另外令 p_c 表示发送帧发生碰撞的概率，p_o 表示信道为忙的概率。如图中所示，各状态之间的转移概率如下：

a）当站点感知到信道空闲时，退避计时器减 1，发生状态转移的概率。

$$p\{0,s-1\,|\,0,s\}=1-p_o$$

b）当站点检测到信道忙，冻结退避计时器的转移概率。

$$p\{0,s\,|\,0,s\}=p_o$$

c）根据 CSMA/CA 机制的规定，当站点的发送失败时，要

开始重传，就要重新执行 CSMA/CA，本文采用这一规定，而站点发送失败的概率为 p_c（和信道状态无关，因为退避计时器为 0 时，信道必定处于空闲状态），因此 level1 站点状态转移到{0，s}(0≤s≤w-1)状态的某一个的概率为 p_c/w，level2 节点转移到{0，s}(w≤s≤2w-1)状态的某一个的概率也为 p_c/w，level3 节点转移到{0，s}(2w≤s≤3w-1)状态的某一个的概率也为 p_c/w。根据 CSMA/CA 机制的规定，当一次成功的发送结束后，再接着发送第 2 个帧也要重新开始执行 CSMA/CA，但是本文在此利用退避算法得到 CCC 信道使用权后，只要一次发送成功预约到信道就达到目的，不会再发送第二次，因此在这里不考虑发送成功后次用户节点的状态转移概率。因此，对于三类等级的次用户，从{0,0}状态转移到{0,s}状态的概率各为 p_c/w。

$$p\{0,s\,|\,0,0\}=p_c/w \qquad (level1: 0\le s\le w-1)$$
$$p\{0,s\,|\,0,0\}=p_c/w \qquad (level2: w\le s\le 2w-1)$$
$$p\{0,s\,|\,0,0\}=p_c/w \qquad (level3: 2w\le s\le 3w-1)$$

根据文献[15],本文让 $v_{0,s}=\lim_{t\to\infty}P\{0,f(t)=s\},s\in(0,w-1)$ 作为马尔可夫链的平稳分布。根据马尔可夫链的规律，由文献[15]的结论可得，平稳状态下以下等式成立：

$$v_{0,s}=\frac{w-s}{w}v_{0,0} \qquad s\in(0,w-1) \tag{1}$$

同理可得，$v_{0,s}=\frac{2w-s}{2w}v_{0,0}$，$s\in(0,2w-1)$，$v_{0,s}=\frac{3w-s}{3w}v_{0,0}$，$s\in(0,3w-1)$。另外根据概率守恒规律，可得以下等式：

$$\sum_{s=0}^{w-1}v_{0,s}=1 \tag{2}$$

通过使用方程式（1）和（2），可得对于 level1 节点：

$$v_{0,0(\text{level1})}=\frac{2}{w+1} \tag{3}$$

同理可求对于 level2 节点：

$$v_{0,0(\text{level2})}=\frac{2}{2w+1} \tag{4}$$

同理可求对于 level3 节点：

$$v_{0,0(\text{level3})}=\frac{2}{3w+1} \tag{5}$$

当 CCC 信道空闲时，本文把时间划分为多个时隙，时隙长度为 e。μ 作为一个站点在一个时隙内开始发送信息的概率。可知当退避计时器等于 0 时，对于本文的马尔可夫链模型，也就是站点处在{0,0}状态时站点开始发送数据，因此 μ 可以表示为

$$\mu=b_{0,0} \tag{6}$$

而对于三类等级次用户，μ 的值分别为 $\mu_1=\frac{2}{w+1}$、$\mu_2=\frac{2}{2w+1}$、$\mu_3=\frac{2}{3w+1}$。同时，在一个时隙内，信道为忙的概率（假设主用户没有使用信道），即 n 个次用户节点至少进行一次数据传输的概率，可以用式(7)表示。

$$p_o=1-(1-\mu_1)^{n_1}(1-\mu_2)^{n_2}(1-\mu_3)^{n_3} \tag{7}$$

在至少有一个站点发送数据（即 p_o）的条件下，一次传输是成功的概率即为在信道上只有一个站点传输的概率，设在一个时隙内只有一个站点发送成功的概率为 p_m，则 p_m 的值如式（8）所示。

那么在竞争 CCC 信道使用权阶段，让 p_n 表示在一个时隙内信道为空的概率，p_u 表示在一个时隙内成功完成一次信息交换的概率，p_d 表示未完成信息交换的概率，那么 $p_n=1-p_o$，$p_u=p_op_m$，$p_d=p_o(1-p_m)$，在竞争 CCC 信道阶段成功预约到一条信道的平均时间 η 为

$$p_m=\frac{(1-\mu_1)^{n_1-1}(1-\mu_2)^{n_2-1}(1-\mu_3)^{n_3-1}(n_1\mu_1(1-\mu_2)(1-\mu_3)+n_2\mu_2(1-\mu_1)(1-\mu_3)+n_3\mu_3(1-\mu_2)(1-\mu_1))}{p_o} \tag{8}$$

$$\eta=\frac{p_ne+p_ut_u+p_dt_d}{p_u} \tag{9}$$

t_u 是一次成功的信息交换占用信道的平均时间，t_d 是信道处于碰撞状态的平均时间，e 是时隙的长度。其中 $t_u=RTS+\sigma+SIFS+CTS+\sigma+SIFS+CRTS$，σ 是传播时延。因为如果 RTS 发送失败，信道经过一个 DIFS（Distributed Inter-frame Spacing,分布式帧间间隔）的时间就会重新变为空闲状态，所以 $t_d=RTS+DIFS$。假设竞争 CCC 信道阶段（信道协商与预留阶段）的时长为 T，则根据上述结论可以得出信道协商与预留阶段的合理时长。其时长等于预约到一条信道的平均时间 η 与当前 CRN 的可用信道数量的积，假设当前 CRN 共有 n_{ch} 条可用信道，那么可以保证成功预约到所有可用信道的信道协商与预留阶段的时长可近似为 $n_{ch}\eta$，即

$$T=\frac{n_{ch}p_ne+n_{ch}p_ut_u+n_{ch}p_dt_d}{p_u} \tag{10}$$

3　实验仿真

本文考虑这样一个网络模型，在一个认知无线电网络 A 内所有的次用户节点均匀地分布在网络中，在这个网络域中有 3 个 level1 的次用户，2 个 level3 的次用户。同时有一个共存的异构的认知无线电网络 B，它有 2 个次用户。在当前区域内有固定可用的 5 个授权信道，主用户的到达概率为 p_u。同时假定网络 A 中的次用户开始通信前，网络 B 中的 2 个次用户已经占用了 2 个授权信道。本文为了方便仿真，假设感知阶段次用户可以感知所有授权信道（通常在较短的时间内，次用户只能感知部分信道，关于部分感知的问题本文在这里不做展开）。并规定在数据传输阶段，每个预约到信道的次用户均有 5 个连续的帧发送，帧大小为 256 Byte。在这样的设置下，本文利用

OMNeT++仿真工具进行了如下仿真实验。

本文以 FQMAC 分别和 OMC-MAC[10]（同样使用公共控制信道），以及 ACAP-MAC[16]作比较。图 5 展示的是比较的仿真结果（纵坐标是归一化后的结果）。显然 FQMAC 的吞吐量性能要明显好于 OMC-MAC 和 ACAP-MAC。随着 PU（主用户）的到达概率逐渐变大，授权信道的可用性逐渐变小，三种通信协议的吞吐量都随之减小。但是很明显，无论信道可用性是怎样的，FQMAC 的吞吐量都比另外两种 MAC 协议的吞吐量要好。这主要是因为 FQMAC 使得原来在 OMC-MAC 和 ACAP-MAC 下不能使用的另外异构网络的次用户占用的信道变为通过竞争可用，尽管使用这些信道进行数据传输是有竞争的，但是仍然增加了可用信道的数量。而图 5 所示的仿真结果从数据上较直观地展示了这一效果。

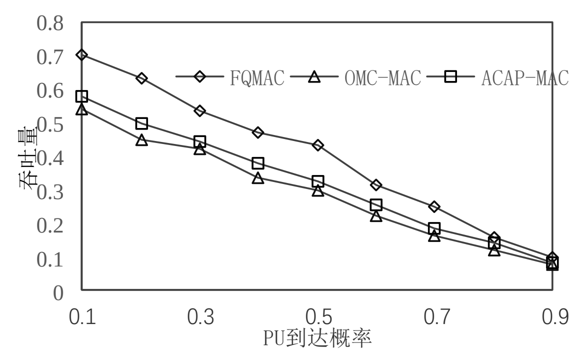


图 5　不同 PU 到达概率下的饱和吞吐量

Fig.5　Saturation throughput under different PU arrival probabilities

同样地，本文还是考虑的上述实验背景，在有 2 个异构网络次用户占用了 2 个授权信道的情况下，进行的本项实验。本文用 OMC-MAC 和 FQMAC 做比较（OMC-MAC 也是考虑了 QoS 需求的 MAC 协议），仿真结果如图 6 所示，其中纵坐标的数值是归一化后的结果。

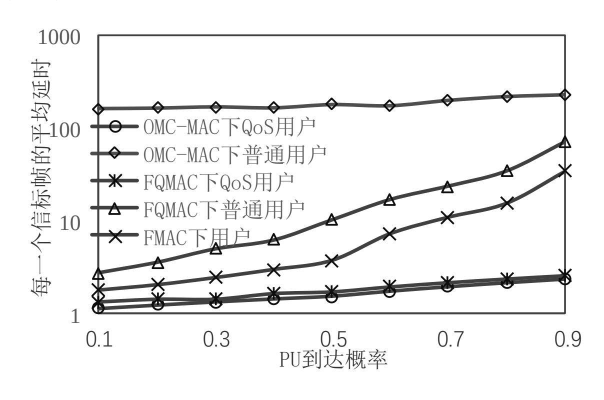


图 6　平均信道接入延时

Fig.6　Average access delay of channel

根据结果可以看出，QoS 用户（在 FQMAC 中的 level1 用户）在 OMC-MAC 和 FQMAC 下的平均延时差不多，但是普通用户的情况两者差距较大。可以看到 OMC-MAC 下的普通用户延时远远高于 FQMAC 下普通用户的延时，而且 OMC-MAC 下普通用户的延时变化较小。这主要是因为在 OMC-MAC 下，所有用户都只能感知到 3 个空闲信道，当 QoS 用户存在的情况下，2 个普通次用户基本上只能等到 QoS 用户不使用信道的时候才可以接入信道，而如果 QoS 用户一段时间内一直有数据要传输的情况下，每一个信标周期它们都会抢信道，普通次用户只能一直等待甚至被“饿死”。而 FQMAC 下 2 个普通用户可以和异构网络的次用户竞争使用信道，因此平均接入延时明显要好于 OMC-MAC。而对于同一协议下的普通用户和高级别的 QoS 用户而言，QoS 用户的平均接入延时均明显好于普通用户，这说明两种协议均较好地满足了 QoS 用户的需求，但是在满足 QoS 用户需求的前提下，FQMAC 在普通用户的平均延时方面表现要好于 OMC-MAC。

为了测试 FQMAC 协议的公平性，本文引入了文献[12]中提到的 Jain 指数（Jain Index）。假设有 N 个共存的 CRN（CRN），让 Δ 表示一小段时间，称为一个 cycle。记录下每一个 CRN 在前 K 个 cycle 的传输时间，让向量 $\vec{T}(k)=[T_1(k),\dots,T_N(k)]$ 表示 N 个 CRN 在前 k 个 cycle（kΔ）的传输时间，在 $1\le k\le K$ 的情况下，Jain 指数可以表示为：

$$J(\vec{T}(k))=\frac{(\vec{1}\cdot\vec{T}^{T}(k))^2}{N\,\|\vec{T}(k)\|^2}$$

其中 $\vec{1}=[1,1,\dots,1]$ 是一个 1 行 N 列的行向量，$\vec{T}(k)$ 的转置矩阵是一个 N 行 1 列的列向量。从而根据记录下的传输时间和 N 可求出 Jain 指数。Jain 指数越大，表明公平性越好，理想情况下，Jain 指数为 1。本文这里让 Δ 为连续发送 5 个帧所需要的时间，然后分别取 N 值为 5 和 10（即分别为 5 个 CRN 共存的情况和 10 个 CRN 共存的情况）进行测试，仿真结果如图 7 所示。

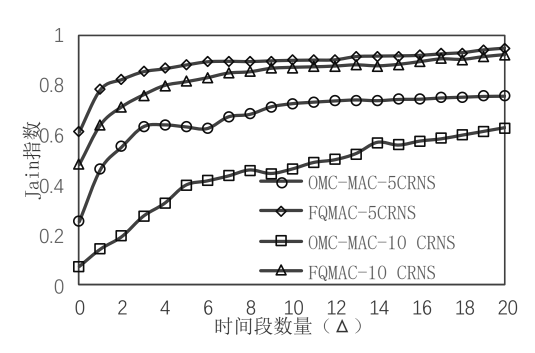


图 7　从 Δ1 至 Δ20 的 Jain 指数

Fig.7　Jain index from Δ1 to Δ20

从图 7 中可以看出，在共存 CRN 数量相同的前提下，FQMAC 的公平性指数明显比 OMC-MAC 要高，这说明 FQMAC 的公平性比 OMC-MAC 的公平性要好，这主要是因为 FQMAC 使当前网络次用户有了和异构网络的次用户竞争信道的能力。从图 7 中也可以看出，当 CRN 数目增加的情况下，OMC-MAC 的公平性明显下降了许多，这说明共存 CRN 的数量对公平性的影响较大，而且共存 CRN 数越多，公平性越差。但是相对来说，随着 CRN 数的增加，FQMAC 的公平性指数下降的不是很明显，这说明在共存的 CRN 数量变化的情况下，FQMAC 的公平性表现也很好。

4 结束语

本文提出了一种考虑异构网络共存情况的认知无线电网络的 MAC 协议 FQMAC，本协议确保了在异构网络共存情况下可用信道数量的最大化，使得次用户可以使用更多的信道进行传输。并在此基础上提出了信道分级和次用户分级机制，及基于此的 QoS 保障机制，根据可用信道的特性进行等级划分，使得次用户的信道选择更加合理，保障了对 QoS 要求比较高的次用户的需求。同时所有用户均按照等级从高到低预约信道，保证了优质信道的优先利用，使得信道资源的利用更高效，也进一步优化了网络的性能。并通过建立马尔可夫链模型进行理论分析，得出了信道协商与预留阶段的合理时长的理论值。通过仿真实验表明，同样的背景下，FQMAC 的网络吞吐量比参照的 MAC 协议有了较大的提升。同时，FQMAC 对普通用户的信道接入延时对比参考协议也有了较好的改善。由于采用了三状态信道模型，使次用户可以和异构网络次用户竞争使用授权信道，也很好地改善了网络中次用户的公平性。同时，本文所采用的控制信息交换机制（RTS-CTS 机制），避免了隐藏终端的问题，同时降低了感知错误导致次用户和主用户的冲突概率。另外，在数据传输阶段高等级次用户的传输通常是无竞争的，这也有效地提高了频谱空洞的利用率。

参考文献：

[1] Hsu A, Wei D, Kuo C. A cognitive MAC protocol using statistical channel allocation for wireless ad-hoc networks [C]// Proc of IEEE WCNC. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007 : 105-110.

[2] Du Manyi, Zheng Meng, Song Min. An Adaptive Preamble Sampling Based MAC Protocol For Cognitive Radio Sensor Networks [J]. IEEE Sensors Letters, 2018, 2 (1): 10-15.

[3] Mansoor N, Islam A, Zareei M, *et al.* RARE: A Spectrum Aware Cross-Layer MAC Protocol for Cognitive Radio Ad-Hoc Networks [J]. IEEE Access, 2018 (6): 22210 -22227.

[4] Cheng Wenchi, Zhang Xi, Zhang Hailin. Pilot-based full-duplex spectrum-sensing and multichannel-MAC over non-time-slotted cognitive radio networks [C]// Proc of IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 1-9.

[5] Kadam S, Raut C S, Kasbekar G S. Fast node cardinality estimation and cognitive MAC protocol design for heterogeneous M2M networks [C]// Proc of IEEE Global Communications Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 1-7.

[6] Chu T, Zepernick H, Phan H. MAC protocol for opportunistic spectrum access in multi-channel cognitive relay networks [C]// Proc of the 85th IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 1-7.

[7] Liu Yi, Yu Rong, Pan Miao, *et al.* SD-MAC: spectrum database-driven MAC protocol for cognitive machine-to-machine networks [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2017, 66 (2): 1456-1467.

[8] Luo Yu, Pu Lina, Peng Zheng, *et al.* Dynamic control channel MAC for underwater cognitive acoustic networks [C]// Proc of the 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2016: 1-9.

[9] Long L, Hossain E. A MAC protocol for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks [C]// Proc of IEEE WCNC. Piscataway, NV, NJ: IEEE Press, 2008: 1426-1430.

[10] Jha S C, Phuyal U, M. Rashi M, *et al.* Design of OMC-MAC: an opportunistic multi-channel MAC with QoS provisioning for distributed cognitive radio networks [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2011, 10 (1): 3414-3425.

[11] Zhao Yanxiao, Song Min, Xin Chunsheng. Spectrum sensing based on three-state model to accomplish all-level fairness for co-existing multiple cognitive radio networks [C]// Proc of IEEE International Conference on Computer Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012: 1782-1790.

[12] Zhao Yanxiao, Song Min, Xin Chunsheng. FMAC: A Fair MAC Protocol for Coexisting Cognitive Radio Networks [C]// Proc of IEEE International Conference on Computer Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2013: 1474-1482.

[13] Berger-Sabbatel G, Duda A, Heusse M, *et al.* Short-term fairness of 802. 11 networks with several hosts [J]. Mobile and Wireless Communication Networks, 2005, 1 (1): 263-274.

[14] Bianchi G. Performance analysis of the ieee 802. 11 distributed coordination function [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18 (1): 535-547.

[15] Ziouva E, Antonakopoulos T. CSMA//CA performance under high traffic conditions: throughput and delay analysis [J]. Computer Communications, 2002, 25 (3): 313-321.

[16] Anany M, Sayed S G. Opportunistic multi-channel MAC protocol for cognitive radio networks [C]// Proc of IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering Piscataway. , NJ: IEEE Press, 2016: 1-6.